

SPATIAALISESTI EPÄTASAISEN IRRADIANSSIN VAIKUTUS AURINKOKENNON TOIMINTAAN

Sampo Antero Hyvärinen

Sähkötekniikan korkeakoulu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 23.5.2016.

Työn valvoja:

Prof. Erkki Ikonen

Työn ohjaajat:

TkT Petri Kärhä, DI Antti Tolvanen

Aalto-yliopisto
Diplomityön
Sähkötekniikan korkeakoulu
Tiivistelmä

Tekijä: Sampo Antero Hyvärinen

Työn nimi: Spatiaalisesti epätasaisen irradianssin vaikutus aurinkokennon toimintaan

Päivämäärä: 23.5.2016

Kieli: Suomi

Sivumäärä: 7 + 35

Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos

Professuuri: Mittaustekniikka

Työn valvoja: Prof. Erkki Ikonen

Työn ohjaaja: TkT Petri Kärhä, DI Antti Tolvanen

Diplomityön tavoitteena on selvittää aurinkokennon vaste spatiaalisesti epätasaiselle irradianssille. Tutkimuskysymyksen innoittajana toimivat aurinkosimulaattoristandardin, IEC 60904-9, vajavaisuudet aurinkokennojen mittauksen suhteen. Aurinkokennon vasteen selvittämiseksi työssä käytettyä näytettä simuloitiin SpiceGui-simulointiohjelmalla, jolla voidaan rakentaa kaksiulotteisia malleja aurinkokennoista. Simuloinneissa aurinkokenno esitettiin sijaiskytkentänä, johon kuuluu virtalähde, diodi ja häviöitä kuvaavia resistansseja. Aurinkokenno simuloitiin ja mitattiin viidellä irradianssin epätasaisuudella, mistä selvisi että irradianssin epätasaisuus vaikuttaa oletettua vähemmän aurinkokennon vasteeseen. Tarkasteltaessa näytteen hyötysuhdetta eri epätasaisuuksilla huomattiin, että 2% epätasaisuudella näytteen hyötysuhde on 0.68 % suurempi kuin 20 % epätasaisuudella. Alle prosentin ero hyötysuhteessa on samaa suuruusluokkaa kuin mittalaitteen mittauserävarmuus. Tulosten perusteella voidaan todeta että aurinkokennosimulaattoreille sovellettavat irradianssin epätasaisuuden rajat 2 %, 5 % ja 10 % ovat tarpeettoman tiukat.

Avainsanat: aurinkokenno, aurinkosimulaattori, IEC-60904-9, irradianssin epätasaisuus

Aalto University
School of Electrical Engineering
Abstract

Writer: Sampo Antero Hyvärinen

Name: Effect of Irradiance Non-uniformity on Solar Cell Performance

Date: 23.5.2016

Language: Finnish

Pages: 7 + 35

Department of Signal Processing and Acoustics

Professorship: Measurement Science and Technology

Supervisor: Prof. Erkki Ikonen

Advisors: D.Sc. Petri Kärhä, M.Sc. Antti Tolvanen

The goal of this master's thesis is to study the response of solar cells to non-uniform irradiation. This research is inspired by solar simulator standard IEC 60904-9 and its shortcomings concerning solar cell measurements. To investigate the response of a solar cell it is simulated with SpiceGui software. The software is used to create two-dimensional models of solar cells from electronic components and to simulate the created models. These equivalent circuits are composed of current sources, diodes and resistances that represent losses in the solar cell. Simulations are done with four different irradiance non-uniformities: 2 %, 10 %, 20 % and 50 %. After the simulations, a similar solar cell that is used in simulations was measured with 2 %, 20 % and 50 % irradiance non-uniformities. According to the results from simulations and measurements, irradiance non-uniformity affects solar cells less than expected. Comparing non-uniformities of 2 % and 20 % it is seen that the efficiency of the solar cell changes only by 0.68 %. This change in efficiency is of the same order of magnitude as the measurement uncertainty of solar simulators. Based on the results it can be stated that classes of 2 %, 5 % and 10 % for irradiance non-uniformity applied on solar cell solar simulators are unnecessary strict.

Keywords: Solar Cell , Solar Simulator, IEC-60904-9, Irradiance Non-Uniformity

Esipuhe

Tämä diplomityö tehtiin Endeas Oy:lle tukemaan yrityksen asiantuntemusta aurinkokennojen mittauksesta. Endeas Oy valmistaa ja myy aurinkosimulaattoreita maailmanlaajuisesti, ja sen tuoteportfolio sisältää aurinkokennosimulaattorien lisäksi useita aurinkomoduulisimulaattoreita. Endeas Oy:n henkilöstöstä haluan erityisesti kiittää diplomi-insinöörejä Antti Tolvasta ja Jaakko Hyväristä asiantuntemuksesta ja tuesta diplomityöhön liittyvissä käytännön mittauksissa ja simulaatioissa. Aalto-yliopiston puolelta työtä valvoi professori Erkki Ikonen ja ohjasi tekniikan tohtori Petri Kärhä. Professori Erkki Ikosta haluan kiittää valvonnasta ja mahdollisuudesta tehdä diplomityöni signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitokselle. Tekniikan tohtori Petri Kärhälle kuuluu kiitos diplomityön kielellisen osuuden asiantuntevasta ohjauksesta sekä työn päämäärän ja rakenteen selkeyttämisestä.

Otaniemi, 23.5.2016

Sampo Antero Hyvärinen

Lyhenteet ja Symbolit

Lyhenne	Selite
AM1.5G	Auringonvalon spektri kun se on kulkenut ilmakehässä 1.5 kertaa ilmakehän paksuuden verran
IV-käyrä	Virta-jännite käyrä
FF	Täytekerroin engl. fill factor
ISE	Irradianssin spatiaalinen epätasaisuus

Symboli	Selite	Yksikkö
R_{\blacksquare}	neliöresistanssi	Ω/\blacksquare
ρ	resistiivisyys	Ωm
t	johteen paksuus	Ω
I_{sc}	oikosulkuvirta	A
I_{mp}	maksimitehopisteenvirta	A
V_{oc}	avoimen piirin jännite	V
V_{mp}	maksimitehopisteenjännite	V
η	hyötysuhde	%
R_s	sarjavastus	Ω
R_{sh}	shunttivastus	Ω
R_m	virrankeräyskuvoinnin neliöresistanssi	Ω/\blacksquare
R_e	emitterin neliöresistanssi	Ω/\blacksquare

Symboli	Selite	Yksikkö
R_{em}	virrankeräyskuvioinnin ja emitterin välinen resistanssi	Ω
R_k	kannan neliöresistanssi	Ω/\blacksquare
R_{kt}	kannan ja takakontaktin välinen resistanssi	Ω
R_t	takakontaktin neliöresistanssi	Ω/\blacksquare
E_{\max}	irradianssin maksimiarvo	W/m^2
E_{\min}	irradianssin minimiarvo	W/m^2
I_1	diodin kyllästysvirta	nA/cm^2
n	diodin ideaalisuuskerroin	—
X	solujen lkm x-suunta	kpl
Y	solujen lkm y-suunta	kpl
w	solujen leveys	μm
h	solujen korkeus	μm

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto.....	1
2 Aurinkokennon toiminta ja rakenne.....	4
2.1 Aurinkokennon sähköiset parametrit	8
2.2 Aurinkosimulaattori	10
3 Aurinkokennon vasteen simulointi.....	12
3.1 Simulointiohjelma.....	14
3.2 Simulaatiomalli	16
3.3 Simulaatio.....	20
4 Mittaukset.....	22
5 Tulosten vertailu.....	28
6 Yhteenveto	33
Lähteet	34

1 JOHDANTO

Aurinkoenergian muuttaminen sähköksi aurinkokennoilla on teknologiana ollut olemassa vuosikymmeniä. Korkean hinnan takia se ei kuitenkaan ole ollut kilpailukykyistä kuin vasta viime vuosina. Vuonna 2009 aurinkosähkön pääomakustannukset laskivat ensimmäistä kertaa alle yhden dollarin per watti. Tätä pidettiin taitekohtana, jonka jälkeen aurinkosähkö on kilpailukykyinen muiden energiamuotojen kanssa [1]. Vuoden 2009 jälkeen hinta on laskenut entisestään, ja First Solarin toimitusjohtaja Jim Hughes ennustaa, että lähivuosina myös asennetun aurinkosähkön hinta laskee alle dollariin per watti [2]. Myönteinen hintakehitys näkyy asennetun aurinkosähkön määrässä sekä valtioiden suunnittelemissa projekteissa. Kiinan, Intian ja Saudi-Arabian lähitulevaisuuden suunnitelmissa maat asentavat vuoteen 2020 mennessä yhteensä yli 100 GW aurinkosähköä. Yleisesti spekuloidaan, että luku voisi jopa tuplaantua Kiinan nopean kaupungistumisen ja energiantarpeen takia. Vertauksen vuoksi mainittakoon että vuoden 2014 lopulla maailman aurinkoenergian tuotannon kokonaiskapasiteetti oli 177 GW [3 - 6].

Aurinkokennoja ja -moduuleita testataan aurinkosimulaattorilla, joka antaa mittaustuloksina mitattavan kohteen sähköiset parametrit, kuten maksimitehon. Aurinkosimulaattori voidaan jakaa karkeasti kolmeen osaan, jotka ovat valonlähde, elektroninen kuorma ja optinen suodatin, joka muokkaa valonlähteen spektrin halutunlaiseksi. Valonlähde tuottaa kymmenien millisekuntien mittaisen valopulssin, joka muokataan vastaamaan auringon spektriä, ja jonka irradianssi on mittaustasossa 1000 W/m^2 . Elektroninen kuorma ohjataan valopulssin aikana avoimesta piiristä oikosulkuun, jolloin kuorman läpi menevää virtaa ja sen yli olevaa jännitettä mittaamalla saadaan tuloksena virta-jännite-käyrä (IV-käyrä).

Aurinkomoduulien ja kennojen standardoitu mittausjärjestelmä on määritelty standardissa IEC 60904-9 [7]. Standardin tarkoitus on taata vertailukelpoiset mittaustulokset eri aurinkosimulaattorien välillä. Standardissa määritellään mittausasetelma, mittausolosuhteet ja kriteerit mittausjärjestelmän suorituskyvylle. Mittausolosuhteiksi mittaustasossa on asetettu 25°C lämpötila, 1000 W/m^2 irradianssi ja AM1.5G spektri. AM1.5G spektri vastaa maan ilmakehässä suodattunutta auringonvalon spektriä, kun se on matkannut ilmakehässä 1.5 kertaa ilmakehän paksuuden verran. Mittausjärjestelmän suorituskyvyn kriteerit luokittelevat aurinkosimulaattoreita spektrin, spatiaalisen valontasaisuuden ja temporaalisen valontasaisuuden perusteella. Kullekin kriteerille on määritelty luokat A, B ja C, joilla luokitellaan kuinka tarkasti mittausjärjestelmä vastaa standardin asettamia absoluuttisia arvoja.

Tämän työn tavoite on selvittää, onko standardin IEC 60904-9 kriteeri irradianssin spatiaaliselle tasaisuudelle perusteltu aurinkokennoja mitattaessa. Tutkimuskysymys on perusteltu, sillä standardi on luotu aurinkomoduulien mittauksen arviointiin. Aurinkomoduuli on useiden aurinkokennojen sarjaankytkentä ja ne reagoivat muuttuviin olosuhteisiin erilailla. Tasainen irradianssi aurinkomoduulilla johtaa siihen, että jokainen aurinkokenno tuottaa saman virran ja kenno toimii optimaalisesti. Yksittäiselle aurinkokennolle irradianssin tasaisuuden tarve on monimutkaisempi määriteltävä sen monimutkaisemman rakenteen vuoksi.

Epätasaisen irradianssin vaikutusta aurinkokennon toimintaan on tutkittu useiden eri työryhmien toimesta. A Cuevas ja S. López-Romero raportoivat vuoden 1983 tutkimuksessaan, että spatiaalisesti epätasainen irradianssi vaikuttaa aurinkokennon avoimen piirin jännitteeseen. He raportoivat korkeimmillaan 70 mV laskun avoimen piiriin jännitteessä, kun aurinkokennoa varjostettiin kokoojakiskojen ympäriltä [8]. Samankaltaisiin tuloksiin päätyivät E.T. Franklin ja J.S. Coventry artikkelissaan "Effects of highly non-uniform illumination distribution on electrical performance of solar cells" [9]. Näissä tutkimuksissa tutkitut irradianssin epätasaisuudet olivat satoja prosentteja, joten ne eivät anna tarkkaa kuvaa alle 50 % irradianssin epätasaisuuden vaikutuksesta. Yoshiro Hishikawa et al. tutkivat matalamman tason irradianssin epätasaisuuden vaikutusta mittauksin vuonna 2010 julkaistussa artikkelissaan [10]. Tutkimuksesta selvisi että 15 % irradianssin epätasaisuuden vaikutuksesta aurinkokennon täyttökerroin, maksimiteho ja avoimen piirin jännite erosivat alle ± 0.3 % homogeenisen tilanteen tuloksista. Tämä tulos viittaa siihen että standardin IEC 60904-9 kriteerit epätasaiselle irradianssille ovat tarpeettoman tiukat aurinkokennojen mittaukseen sovellettaviksi.

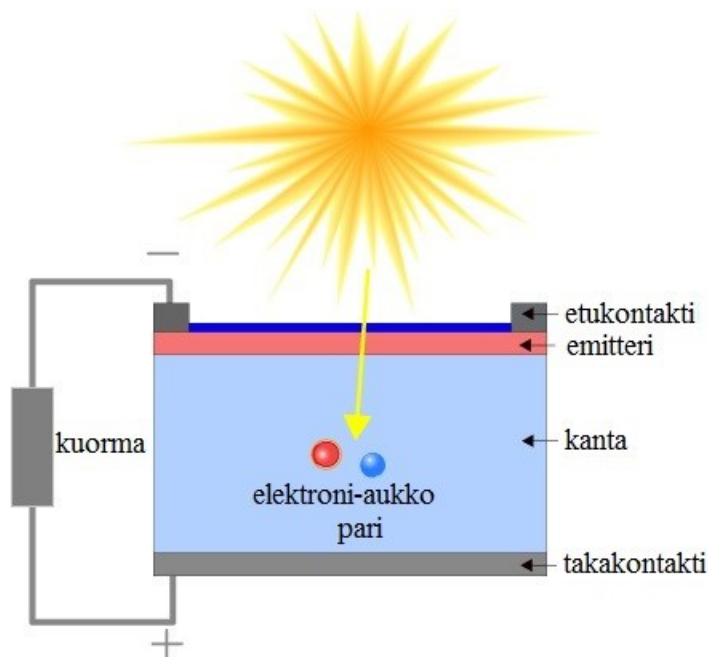
Työstä saatavien tulosten perusteella voidaan arvioida uusien teknologioiden, kuten monikerrosaurinkokennojen, toimintaa. Monikerrosaurinkokennot hyödyntävät auringonspektriä laajemmalla aallonpituuskaistalla kuin nykyiset pii-aurinkokennot, ja niiden hyötysuhde on jopa kaksinkertainen kaupallisiin aurinkokennoihin verrattuna. Käytössä monikerrosaurinkokennolle konsentroidaan linssillä satoja kertoja auringon intensiteettiä suurempi intensiteetti. Näin säästetään aurinkokennon materiaali- ja valmistuskuluissa sekä saavutetaan korkeampi hyötysuhde. Konsentraattorilinssit tuottavat aurinkokennolle valaistuskuvion jonka epätasaisuus voi olla satoja tai tuhansia prosentteja. Tämä on kymmeniä kertoja suurempi kuin tässä työssä tutkittavat epätasaisuudet, joten oletetusti epätasainen

irradianssi vaikuttaa käytännössä enemmän monikerrosaurinkokennoihin kuin nykyisiin pii-aurinkokennoihin.

Tämä diplomityö jakaantuu kuuteen lukuun. Luvussa kaksi käydään läpi aurinkokennojen fysiikkaa lyhyesti ja esitellään valosähköinen ilmiö. Luvussa esitellään myös aurinkokennon rakenne liittyen virrankulkuun, sen keräämiseen aurinkokennolta ja aurinkokennojen mittaus aurinkosimulaattorilla. Luvussa kolme osoitetaan, kuinka aurinkokennolle voidaan rakentaa sijaiskytkentä keskitetyistä komponenteista. Sijaiskytkentää voidaan simuloida tavallisella piirisimulaattorilla, kuten tässä työssä käytetyllä LTspicellä. Luvussa esitellään myös, kuinka sijaiskytkennän komponentit voidaan jakaa useampiin eri tekijöihin, jolloin mallia voidaan käyttää monimutkaisempiin tilanteisiin. Luvun lopussa esitellään simulaatioparametrit ja tehdyt simulaatiot. Luvussa neljä kerrotaan, kuinka mittaukset toteutettiin epätasaisella irradianssilla. Mittaukset toteutetaan aurinkosimulaattorilla, jossa epätasainen irradianssi toteutetaan näytteen pinnalle asetetuilla harmaasuotimilla. Simulaatioiden ja mittausten tulokset esitellään luvussa viisi. Luvussa tuloksia verrataan simulaatioiden ja mittausten välillä, ja esitetään tulosten perusteella miten irradianssin epätasaisuus vaikuttaa aurinkokennon vasteeseen. Luku kuusi on yhteenveto, jossa kerrataan työn sisältö lyhyesti ja esitetään johtopäätös tulosten perusteella.

2 AURINKOKENNON TOIMINTA JA RAKENNE

Aurinkokenno on yksinkertaistettuna suuri valodiodi, joka on suunniteltu muuttamaan sähkömagneettinen säteily suoraan sähköenergiaksi mahdollisimman tehokkaasti. Pii-aurinkokennot absorboivat sähkömagneettista-säteilyä alle 1000 nm aallonpituuksilla, kaupallisten aurinkokennojen hyötysuhde on tällä hetkellä noin 20 %. Aurinkokennon toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa fotonin energia absorboituu puolijohdemateriaaliin, minkä seurauksena materiaaliin syntyy elektroni-aukopari. Aukko on puolijohdefysiikassa käytetty elektronin vastakappale. Aukko, kuten elektroni, on varauksenkuljettaja. Aukko syntyy elektronin jättämään tilaan sen virittyessä korkeammalle energiatilalle puolijohteessa. Aurinkokennossa varauksenkuljettajat ohjataan ulkoiseen piiriin PN-liitoksen avulla, joka antaa aurinkokennolle sen sähkövirtaa tuottavat ominaisuudet. Fyysisesti PN-liitos sijaitsee kuten, kuvassa 1, emitterin ja kannan välissä. PN-liitoksen seurauksena pii-aurinkokennoilla on ominainen noin 0.63 voltin avoimen piirin jännite [11].

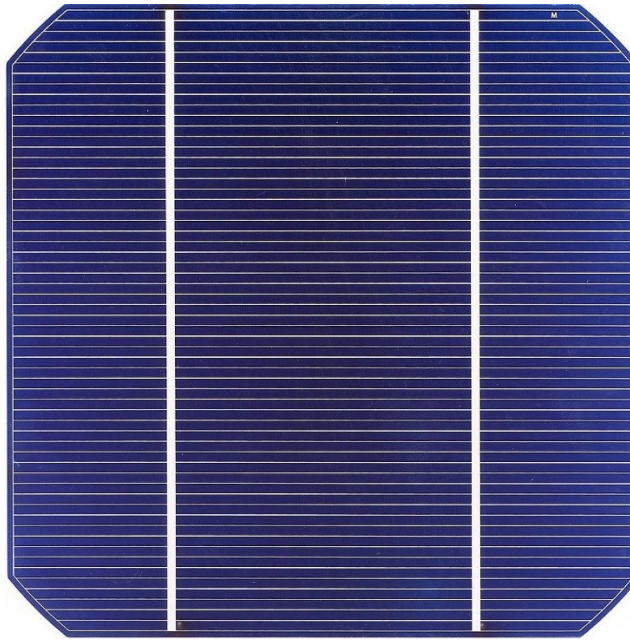


Kuva 1. Aurinkokennon rakenteen pelkistetty poikkileikkaus. [11]

PN-liitos syntyy kun n-tyypin puolijohteen eli kannan päälle kasvatetaan p-tyypin puolijohdetta eli emitteri. P-tyypin puolijohde on tässä tapauksessa piitä, johon on saostettu esimerkiksi booria. Boorilla saostaminen johtaa ylimääräisten aukkojen syntymiseen puolijohteessa, jolloin aukot ovat p-tyypin puolijohteen enemmistövarauksenkuljettajia. N-

tyypin puolijohde on saostettu esimerkiksi fosforilla, jolloin tilanne on päinvastainen eli N-tyypin puolijohdteessa elektronit ovat enemmistövarauksenkuljettajia.

Valmistusvaiheessa aurinkokennon takapuoli peitetään johteella, normaalisti alumiinilla. Tämä takakontakti toimii virrainkeräimenä kannalta sekä kontaktina aurinkokennon ja kuorman välillä. Etupintaan kasvatetaan virrankeräyskuviointi, joka on useimmiten tehty hopeasta. Virrankeräyskuvioinnin tarkoitus on kerätä virta kennon etupinnalta ja johtaa se ulkoiseen piiriin. Virrankeräyskuvioinnin muodon ja pinta-alan optimointi on tärkeä osa aurinkokennon suunnittelua, jotta kennosta saadaan maksimaalinen teho. Virrankeräyskuviointi koostuu kahdesta tai useammasta kokoojakiskosta sekä useista keräysliuskoista, kuten kuvassa 2. Keräysliuskat keräävät virran kennon aktiiviselta alueelta kokoojakiskoille, joilta virta johdetaan ulkoiseen piiriin.



Kuva 2. Vaaleat hopeajohteet aurinkokennon etupinnalla ovat virrankeräyskuviointi. Pystyssä olevat kaksi valkeaa viivaa ovat kokoojakiskot (engl. busbar). Ohuimmat vaakaviivat ovat keräysliuskoja (engl. finger).

Aurinkokennon tuottama virta on suoraan verrannollinen kennolle saapuvaan irradianssiin ja aurinkokennon pinta-alaan. Aurinkokennon pinnalle painettu virrankeräyskuviointi absorboi tai heijastaa osan kennolle päätyvästä irradianssista, mikä pienentää kokonaisvirtaa. Aurinkokennoa varjostava virrankeräyskuviointi ei kuitenkaan rajoita virtaa suoraan pinta-alojen suhteessa, koska valo taittuu kuvioinnin reunoista kennolle. Woehl et al. totesivat tutkimuksessaan että pätevä arvio keräysliuskojen efektiiviselle leveydelle on noin puolet

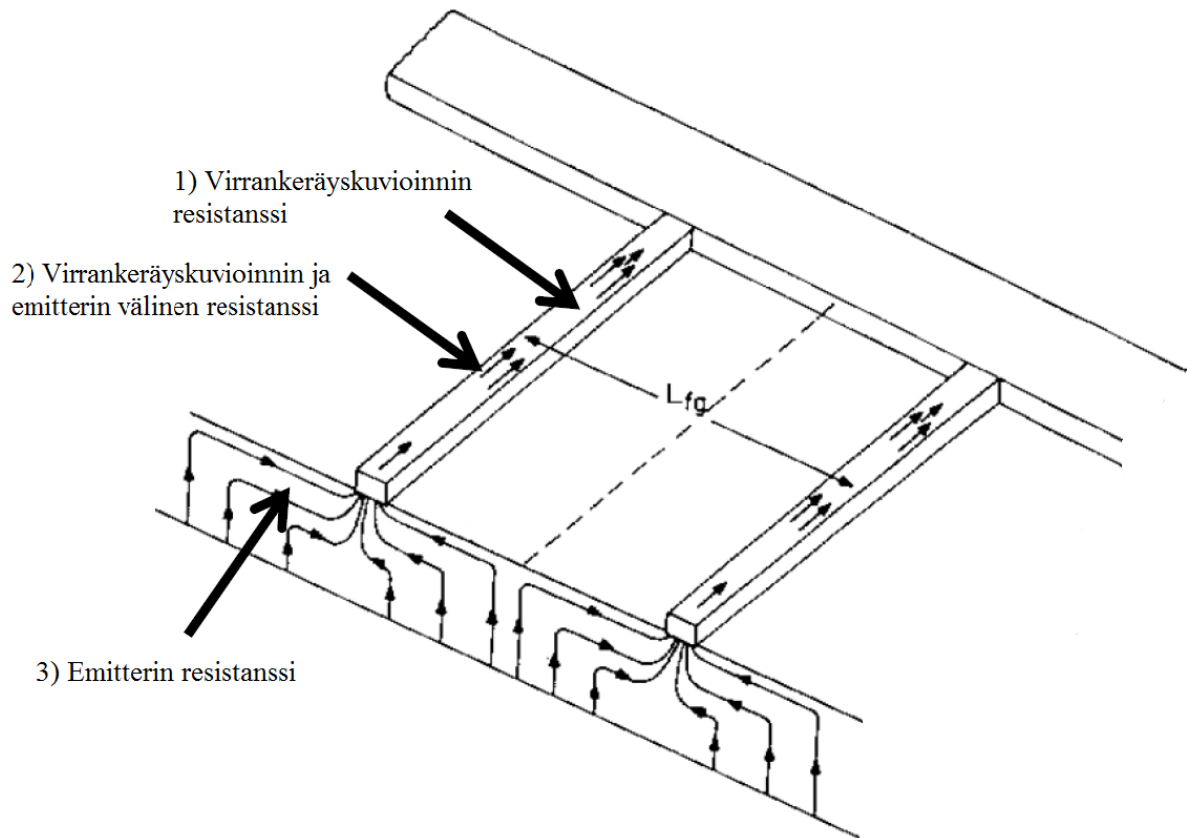
fyysisestä leveydestä [12]. Saman tutkimuksen mukaan kokoojakiskot varjostavat käytännössä koko pinta-alansa. Virrantuottoa rajoittavien tekijöiden lisäksi kokonaisvirtaa rajoittavat resistiiviset häviöt. Häviöitä aiheuttava sarjaresistanssi voidaan jakaa kuuteen eri komponenttiin, jotka ovat pinnan virrankeräyskuvioinnin resistanssi, emitterin resistanssi, pinnan virrankeräyskuvioinnin ja emitterin välinen resistanssi, kannan resistanssi, pohjan virrankeräyskuvioinnin resistanssi ja kannan ja pohjan virrankeräyskuvioinnin resistanssi [13 - 15]. Näiden resistanssien arvot esitetään kirjallisuudessa usein neliöresistiivisyyksinä. Neliöresistanssi,

$$R_{\blacksquare} = \rho/t,$$

(1)

on tasapaksuille kalvoille kehitetty resistiivisyyden määritelmä. ρ on johteen resistiivisyys ja t on johteen paksuus. R_{\blacksquare} ei riipu neliön koosta kunhan t on vakio [16].

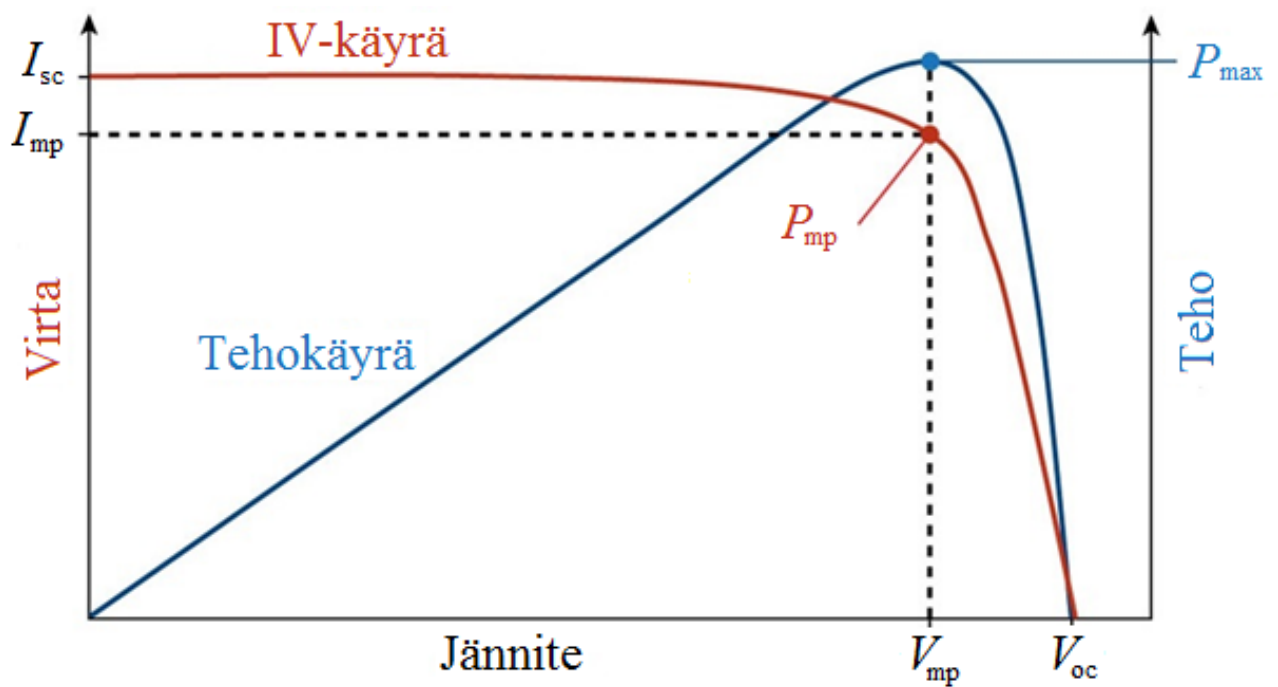
Virrankeräyskuvionti pyritään suunnittelemaan aurinkokennoon siten, että resistiiviset häviöt minimoituvat, mutta samaan aikaan kennosta saadaan maksimaalinen virta. Virta kulkee kennon etupinnassa kuvan 3 osoittamalla tavalla. Virrankeräyskuviontia suunniteltaessa oletetaan tasainen valaistus, jolloin virta on saman suuruinen kaikkialla kennossa.



Kuva 3. Virrankulku aurinkokennon pinnassa [17].

2.1 AURINKOKENNON SÄHKÖISET PARAMETRIT

Aurinkokennon toimintaa kuvaavat seuraavat sähköiset parametrit: avoimenpiirinjännite V_{oc} , oikosulkuvirta I_{sc} , maksimitehopisteen virta I_{mp} , maksimitehopisteen jännite V_{mp} , maksimiteho P_{max} , täyttökerroin (fill factor) FF ja hyötysuhde η . Nämä parametrit lasketaan aurinkokennon virta-jännite-käyrästä (IV-käyrästä), kuva 4.



Kuva 4. Aurinkokennon IV- ja tehokäyrät. Aurinkokennon mittaus aurinkosimulaattorilla antaa vastaavanlaisen tuloksen lukuarvoineen.

Avoimenpiirinjännite V_{oc} on aurinkokennon yli oleva jännite, kun kennoa ei ole kytketty ulkoiseen kuormaan. Avoimen piirin jännitteen määrää pn-liitoksen potentiaaliero. Oikosulkuvirta I_{sc} on maksimivirta, jonka aurinkokenno pystyy tuottamaan oikosulussa. Oikosulkuvirta määräytyy kennon pinta-alasta, irradianssista sekä kvanttihyötysuhteesta. Maksimitehopiste P_{max} on aurinkokennon IV-käyrällä piste, jossa kenno tuottaa maksimitehon. Aurinkokennojen mittaamisessa ja luokittelussa maksimiteho on tärkein yksittäinen suure. Maksimitehopisteen virta I_{mp} sekä jännite V_{mp} mainitaan usein maksimitehopisteen lisäksi, jotta

aurinkokennon käyttö voidaan optimoida. Hyötysuhde η kuvaa kuinka suuren osan säteilytehosta kenno muuttaa sähkötehoksi. Täyttökerrointa,

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}}, \quad (2)$$

käytetään aurinkokennon kokonaisvaltaisen toiminnan arvioimiseen. Täyttökerroin on maksimitehon suhde oikosulkuvirran ja avoimen piirin tuloon. Suuri täyttökerroin merkitsee että maksimitehopisteen jännite ja virta ovat lähellä oikosulkuvirtaa ja avoimen piirin jännitettä. Resistiiviset häviöt laskevat maksimitehopisteen jännitettä ja virtaa, mikä näkyy myös täyttökertoimen arvossa [13]. Täyttökerrointa voidaan käyttää aurinkokennon sisäisten häviöiden arviointiin, ja sen myötä laadun arviointiin.

2.2 AURINKOSIMULAATTORI

Aurinkokennon toimintaa mitataan aurinkosimulaattorilla, joka on standardoitu mittalaite aurinkokennojen ja moduulien mittaamiseen. Aurinkosimulaattori kuvassa 5 koostuu pääpiirteittäin valonlähteestä, mittauselektronikasta sekä tietokoneesta.



Kuva 5. Työssä käytetty aurinkosimulaattori. Vasemmalta lukien kuvassa on elektroniikkayksikkö, valonlähteen energiavarasto, valonlähde, kontaktointiyksikkö, monitoriksenno ja aurinkosimulaattoria ohjaava pc. Tässä työssä ei käytetty kontaktointiyksikköä.

Valonlähde jäljittelee auringonvaloa maanpinnalla. Xenon-välähdyslampulla tuotetun valon irradianssi säädetään arvoon 1000 W/m^2 ja sen spektri suodatetaan vastaamaan AM1.5G spektriä. Valopulssin pituus riippuu simulaattorista. Pulssi voi olla joko jatkuva tai kuten useimmiten tuotantolaitteissa noin 10 - 100 millisekuntia. Valopulssin irradianssi mitataan monitorikennolla, joka on osa aurinkosimulaattoria. Monitorikennolla varmistetaan että valopulssin irradianssitaso on standardin mukainen mittauksen aikana. Monitoriksenno kalibroidaan oikealle irradianssitasolle ennen mittauksia. Kalibroinnissa referenssiaurinkokennosta mitataan teho tuntemattomalla irradianssitasolla. Mittaustuloksen perusteella aurinkosimulaattoriin haetaan irradianssitaso, jolla referenssiaurinkokenno mitataan oikein. Monitoriksenno säädetään liipaisemaan mittaukset tältä irradianssitasolta. Referenssiaurinkokenno on tämän työn tapauksessa hankittu TÜV Rheinland yritykseltä.

Valopulssin aikana mittauselektronikka suorittaa IV-mittauksen, joka tarkoittaa yksinkertaistettuna että aurinkokennoon kytketty kuorma säädetään valopulssin aikana

oikosulusta avoimeen piiriin. Säädön aikana aurinkokennosta mitataan kuorman kautta kulkeva virta sekä aurinkokennon yli oleva jännite. Tässä työssä käytetyn simulaattorin kuorma on 100 mΩ:n virranmittausvastuksen ja transistorin sarjankytkentä. Transistoria käytetään aktiivisena kuormana, jolla aurinkokenno säädetään oikosulusta avoimeen piiriin. Elektroniikkayksikkö sisältää etujännite-kondensaattorin, jota säätämällä saadaan muutettua jännitemittauksen tasajännitetasoa. Tämä tehdään mittajohdoissa esiintyvien häviöiden kompensoimiseksi. Ilman riittävää etujännitettä jännitepyyhkäisy ei ala avoimesta piiristä ja saatu mittaustulos on väärä.

Nykyaikaisissa korkean hyötysuhteen aurinkokennoissa, kuten työssä mitattavassa näytteessä, on jänniteriippuvia kapasitiivisia ominaisuuksia. Näiden aurinkokennojen mittaukseen tarvitaan kaksiosainen jännitepyyhkäisy. Kaksiosaisessa jännitepyyhkäisyssä jännitettä nostetaan aluksi nopeasti, kun jänniteriippuvan kapasitanssin vaikutus ei ole suuri. Kapasitanssin vaikutuksen tullessa merkittäväksi, jännitepyyhkäisyn kulmakerrointa pienennetään. Jännitepyyhkäisyn säätäminen tapahtuu käytännössä säätämällä transistorin läpi kulkevaa aurinkokennon virtaa. Virran kulkua hidastamalla annetaan kapasitiivisille komponenteille aikaa varautua jolloin ne eivät vääristä mittaustuloksia.

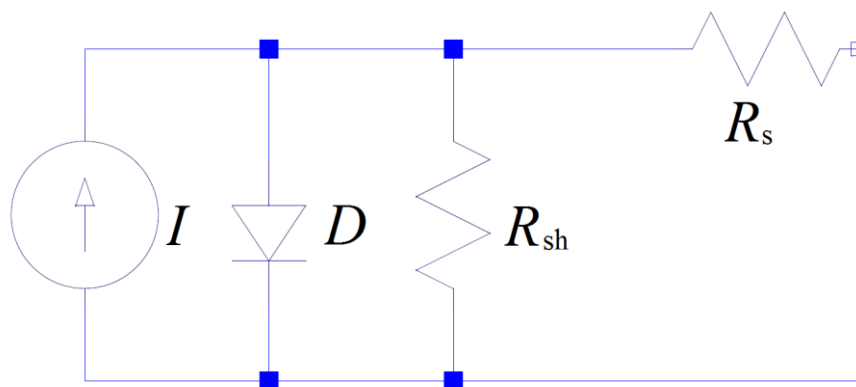
Aurinkosimulaattorien ominaisuuksia määrittelee standardi IEC 60904-9, joka on osa suurempaa IEC 60904 kokonaisuutta. Standardin IEC 60904 osat käsittelevät valosähköistä ilmiötä hyödyntäviä laitteita. IEC 60904-9 keskittyy aurinkosimulaattorien suorituskykyvaatimuksiin sisätiloissa tehtävissä mittauksissa. Standardi luokittelee aurinkosimulaattorit A, B ja C -luokkiin, jotka eroavat suorituskyvyiltään. A-luokan simulaattoreissa irradianssin spatiaalinen epätasaisuus on alle 2 %, spektri eroaa AM1.5G spektristä alle +/- 25 %, ja irradianssin lukuarvo vaihtelee alle 2 % irradianssi-, virta- ja jännitemittauksien välillä. Moderneilla aurinkosimulaattoreilla kaikki mittaukset tehdään samalla ajanhetkellä, joten käytännössä viimeisen kriteerin mukaisesti mittauksien välinen ero on 0 %. Tässä työssä tutkittava irradianssin spatiaalinen epätasaisuus ISE lasketaan yhtälön,

$$ISE = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} * 100\%, \quad (3)$$

mukaisesti [7]. Yhtälössä E_{max} on irradianssin suurin arvo mittaustasossa ja E_{min} irradianssin pienin arvo mittaustasossa. Tässä työssä käytetty aurinkosimulaattori, Endeas Oy:n Quicksun 130CA, täyttää kaikki kolme kriteeriä ollen siten AAA-luokan aurinkosimulaattori.

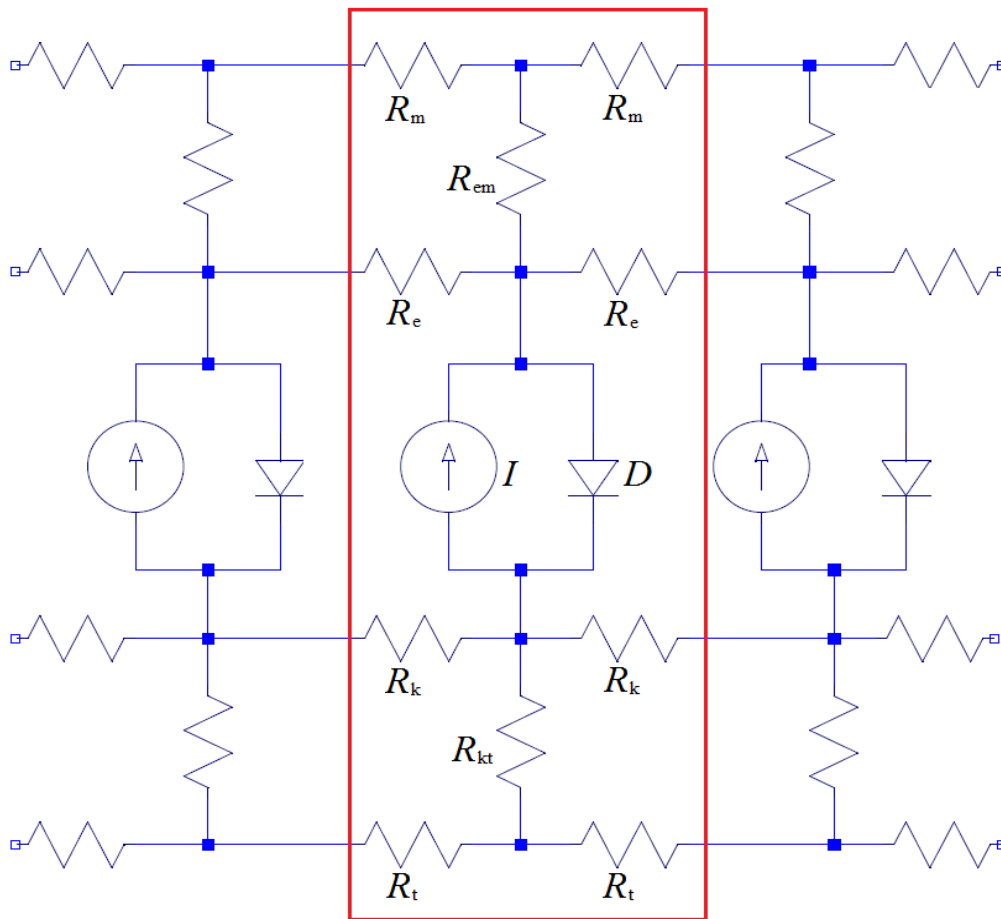
3 AURINKOKENNON VASTEEN SIMULOINTI

Aurinkokenno voidaan esittää diskreeteistä komponenteista koostuvalla sijaiskytkennällä, joka on yksinkertaisimmillaan virtalähteen ja diodin rinnankytkentä. Aurinkokenno on käytännössä diodi, joten diodi on kiinteä osa sijaiskytkentää. Virtalähde kuvaa aurinkokennon kykyä tuottaa virtaa valosta. Virtalähteen suuruus esitetään usein virrantiheytenä (mA/cm^2) ja sen suuruus riippuu tulevan valon määrästä, aurinkokennon optisista ominaisuuksista sekä aurinkokennon kyvystä hyödyntää siihen syntyneet varauksenkuljettajat. Sijaiskytkentään lisätään useimmiten sarja- sekä shunttivastukset, kuten kuvassa 6 on esitetty. Vastukset kuvaavat tehohäviöitä sekä epäideaalisuuksia aurinkokennossa. Shunttivastus jäljittelee aurinkokennon valmistuksessa kennoon tulleita virheitä, kuten emitterikerroksen läpi johtavia lokaaleja oikosulkuja. Sarjavastus kuvaa virtalähteen kanssa sarjassa olevia resistansseja, kuten virrankeräyskuvioinnin resistanssia ja emitterin neliöresistanssia [18].



Kuva 6. Aurinkokennon sijaiskytkentä, joka koostuu virtalähteestä I , diodista D , shunttivastuksesta R_{sh} ja sarjavastuksesta R_s .

Kuvan 7 sijaiskytkennässä sarjavastus on jaettu osatekijöihin, jotta sitä voidaan soveltaa epätasaisen irradianssin vaikutuksen simulointiin. Kuvassa 1 esitettiin aurinkokennon rakenne, johon kuului etukontakti, takakontakti, emitteri sekä kanta. Jokaiselle osalle voidaan määritellä resistanssit, jolloin kuvan 6 sijaiskytkentä saadaan laajennettua kuvan 7 muotoon. Kuvassa 6 R_m kuvaa etukontaktin resistanssia, R_{em} etukontaktin ja emitterin välistä resistanssia, R_e emitterin resistanssia, R_k kannan resistanssia, R_{kt} kannan ja takakontaktin välistä resistanssia ja R_t takakontaktin resistanssia.



Kuva 7. Kuvassa punaisella ympyröity aurinkokennon sijaiskytkennän perusyksikkö. Monistamalla näitä yksinkertaisempia perusyksiköitä saadaan luotua esimerkiksi erilaisia valaisukuvioita tai virrankeräyskuvioita. Vastukset R_m , R_{em} , R_e , R_k , R_{kt} ja R_t on esitelty tekstissä.

3.1 SIMULOINTIOHJELMA

Simulointiin käytettiin Stefan Eidellothin, Felix Haasen ja Rolf Brendelin kehittämää SpiceGUI ohjelmaa [19]. SpiceGUI on Octavelle ja Matlabille kirjoitettu ohjelmisto, joka käyttää SPICE-piirisimulaattoreita laskentaan. Tässä työssä käytettiin Octaven ja LTSpicen yhdistelmää. Kaupallisten ohjelmien, kuten Matlabin ja SMARTspicen, etuna ovat lyhyemmät simulointiajat. Simulointiajat käyttämällä Octavea ja LTSpiceä verrattuna Matlabiin ja Smartspiceen ovat noin viisinkertaiset. Valitut ohjelmistot eivät vaikuta tuloksiin, mutta niillä on mahdollista tehdä tarkempia simulaatioita. SpiceGUI:lla simulointi tapahtuu syöttämällä simulointiparametrit graafiseen käyttöliittymään, jossa määritellään myös simulointiasetukset. Käynnistettäessä simulointi simulointiparametrit välitetään octavelle, joka rakentaa niiden perusteella simuloitavan piirin. Piiri välitetään SPICE-simulaattorille, joka laskee siitä IV-käyrän annettujen parametrien mukaisesti ja tallentaa tuloksen raakatiedostoon. Octave lukee tulokset SPICE-simulaattorin tuottamasta raakatiedostosta ja muokkaa ne analysoitavaan muotoon. Tulokset tallennetaan tiedostoon, josta ne voi ladata SpiceGUI:hin jatkoanalysointia varten.

Simuloitava piiri luodaan SpiceGUI:ssa monistamalla aurinkokennon sijaiskytkennän perusyksiköitä ja kytkemällä ne rinnakkain kuten kuvassa 7. Perusyksikölle on määriteltävä komponenttien määrä ja niiden lukuarvot. Komponenteille voidaan antaa lukuarvot vakioina tai taulukkona. Taulukossa lukuarvon sisältävän solun koordinaatti määrää lukuarvon komponentille, joka on samoissa koordinaateissa sijaiskytkennässä. Sijaiskytkentä voi koostua esimerkiksi 100 x 100 perusyksiköstä, jolloin lukuarvot sisältävän taulukon täytyy olla 100 x 100 solun kokoinen. Lukuarvot voi syöttää myös sarjana tai taulukoiden sarjana, jolloin voidaan simuloida tietynlaista piiriä esimerkiksi eri virrantiheyksillä. Tämä nopeuttaa laajojen simulointien tekemistä huomattavasti. Komponenttien asettamisen lisäksi simulaattorille pitää kertoa perusyksiköiden lukumäärä, niiden fyysinen koko, simuloitavan piirin lämpötila, jännitteiden kytkentäpisteet ja jännitteet, jotka simuloinnissa kytketään kennon yli.

Perusyksiköiden lukumäärä syötetään simulaattorille x ja y -koordinaatteina, joten aurinkokennon muoto on rajoitettu suorakaiteen muotoon. Jokaiselle perusyksikölle voidaan määrätä joko yksilöllinen leveys ja korkeus, tai kaikille sama leveys ja korkeus. Simuloitavan kennon lämpötila määritellään lämpötilariippuvien komponenttien takia. Merkittävin lämpötilariippuva komponentti on diodi, jonka kynnysjännite riippuu lämpötilasta. Kennoon kytkeytyminen määritellään simulaattorissa taulukkona, kuten komponenttiarvot. Taulukossa arvo "1" merkitsee kontaktia ja arvo "0" että kontaktia ei ole. Määrittelemällä kytkeytymispiste voidaan simuloida esimerkiksi epätäydellistä liitosta kennon ja ulkoisen piirin välillä. Kytkeytymispiste täytyy määritellä kennon ylä ja alapuolelle erikseen. Kytkeytymispiste voi olla minkä tahansa muotoinen kuvio, jota rajoittaa kennolle määritelty fyysinen koko. Kytkeytymispisteen lisäksi täytyy määritellä mihin kerrokseen sijaiskytkennässä kytkeytyminen tapahtuu. Tällöin voidaan esimerkiksi simuloida jännitehäviöitä tietyn resistanssin ylitse. Viimeiseksi on määriteltävä jännitepyyhkäisy kennon ylitse. Valitut jännitteet kytketään kytkeytymispisteisiin kennolla.

Simulaattori antaa tuloksena kennon IV-käyrän, josta voidaan laskea tarkempia tunnuslukuja kennon toiminnasta. Käyrää voi tarkastella jokaisessa kennon solussa ja jokaisessa kerroksessa erikseen simulaattorin sisältämillä analyysialgoritmeilla. Simulaattorilla voi myös tulostaa tehotiheys- ja jännitekarttoja kennosta.

3.2 SIMULAATIOMALLI

Tässä työssä simuloitava näyte on $10 \times 10 \text{ mm}^2$ kokoinen aurinkokenno, josta on tehty myös fyysinen kopio mittauksia varten. Simulaatiomallissa kenno on jaettu 100×100 soluun, jotka ovat kuvan 7 perusyksikön kaltaisia. Yksi solu on $100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$ kokoinen neliö, jolle ei ole määritelty paksuutta. Paksuus otetaan huomioon valittaessa simulointiparametrejä. Simulaatioissa lämpötila oli asetettu standardin IEC-60904-9 mukaisesti tasaiseen $25 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilaan. Irradianssin lämmittävä vaikutus jätettiin huomiotta. Kennolle tuleva irradianssi on koko kennon pinta-alalla 1000 W/m^2 . Irradianssi asetettiin maksimissaan arvoon 1500 W/m^2 ja minimissään arvoon 500 W/m^2 . Tämä vastasi maksimissaan 50 % irradianssin epätasaisuutta. Perusyksikön virtalähteelle asetettiin virrantiheyden arvoja, jotka vaihtelivat $\pm 50 \text{ %}$ irradianssin keskiarvosta. Diodin kyllästysvirraksi I_1 valittiin 1000 nA/cm^2 ja ideaalisuuskertoimeksi $n=1$. Nämä parametrit yhdessä määrittävät aurinkokennon avoimen piirin jännitteen [18]. Kenno simuloitiin 30:ssä eri mittapisteessä, jotka on jaettu välille 0.2 V – 0.72 V logaritmisesti, sekä kahdessa erillisessä mittapisteessä jotka ovat 0.1 V ja 0 V . Valitut mittapisteet keskittyvät maksimitehopisteen ympärille IV-käyrällä, joka on tulosten kannalta tärkein osa IV-käyrästä. Mittapisteiden ääripäiksi valittiin 0 V ja 0.72 V , jotta kenno säätyy oikosulusta avoimeen piiriin.

Perusyksikön komponenteille arvioitiin lukuarvot vertaamalla lähteiden [12, 14, 19, 20] komponenttiarvoja keskenään. Simuloinnissa käytetyt parametrit on koottu taulukkoon 1. Lähteissä lukuarvot on etsitty sovittamalla mitattuja IV-käyriä PC1D:llä laskettuihin käyriin eri parametreilla. PC1D on laajalti käytetty aurinkokennojen mallintamisohjelma, jolla voidaan muun muassa laskea IV-käyriä. Lähteiden lukuarvojen välillä oli pieniä eroavaisuuksia virrantiheyksissä sekä emitterin neliöresistansseissa. Emitterin neliöresistanssin tapauksessa käytettiin lähteiden [14] ja [15] arvoja. Virrantiheys arvioitiin mittaamalla IV-käyrä aurinkokennosta, josta fyysinen näyte on leikattu. Saatu oikosulkuvirta suhteutettiin näytteen pinta-alalle. Simuloinnissa käytetyt parametrit on koottu taulukkoon 1.

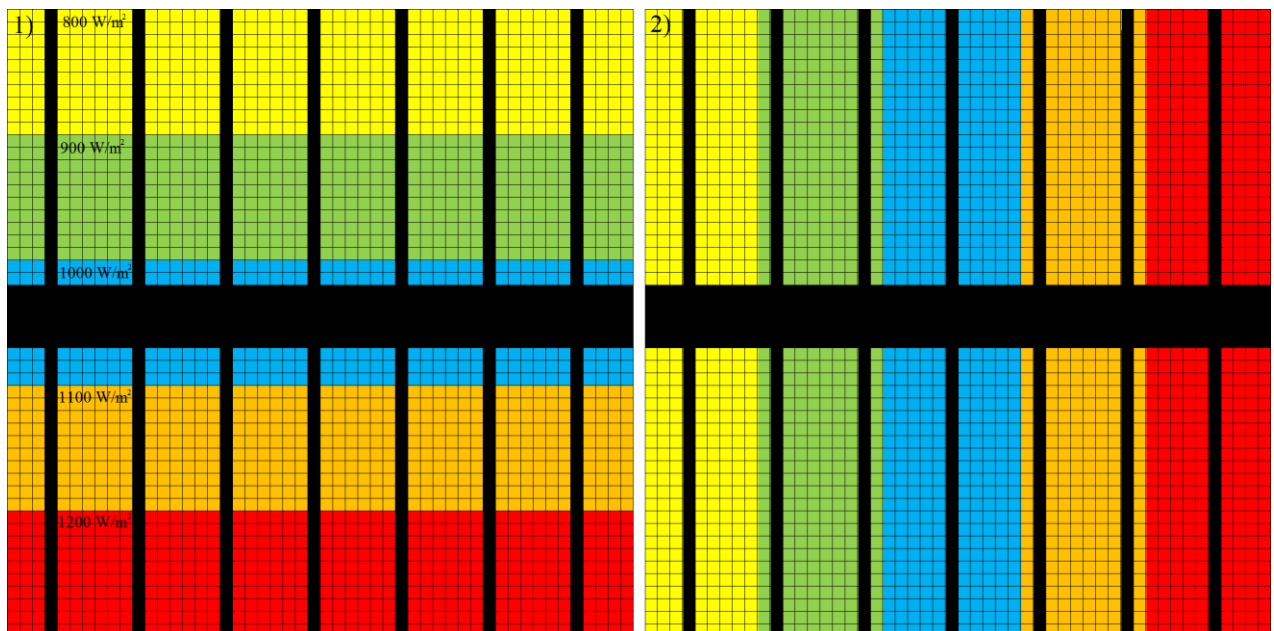
Taulukko 1. Simulointiparametrit sijaiskytkennälle.

Parametri	Symboli	Lukuarvo
Metalloinnin neliöresistanssi	R_m	0.001 Ω/\blacksquare
Metallointi-Emitteri kontaktivastus	R_{em}	0.1 Ω/cm^2
Emitterin neliöresistanssi	R_e	80 Ω/\blacksquare
Virtalähteen virrantiheyden keskiarvo	I_{sc}	37.8 mA/cm ²
Diodin kyllästysvirta	I_1	1000 nA/cm ²
Diodin ideaalisuuskerroin	n	1
Shunttivastus	R_{sh}	150 Ω
Solujen lkm x-suunta	X	100
Solujen lkm y-suunta	Y	100
Solun leveys	w	100 μm
Solun korkeus	h	100 μm

Simuloinneissa oletettiin aluksi shunttivastuksen arvoksi 1000 Ω , joka on hyvä arvio korkealaatuisen aurinkokennon shunttivastukseksi. Näytteen shunttivastus mitattiin mittasarjan jälkeen, kun simulointien ja mittauksien välillä ilmeni suuria eroja. Tällöin selvisi että näytteen shunttivastus on noin 150 Ω . Lähteen [21] mukaan 150 Ω shunttivastus aiheuttaa noin 10 % eron I_{mpn} suuruuteen verrattuna 1000 Ω shunttivastukseen. Vertaamalla näytettä vastaavan ehjän aurinkokennon shunttivastukseen, joka oli noin 700 Ω , on perusteltua olettaa

että näytteen shunttivastus on laskenut laserleikkauksen johdosta. Shunttivastus on fyysisesti oikosulku kannan ja emitterin välillä, joten leikkausprosessissa shunttivastukset ovat todennäköisimmin muodostuneet näytteen reunoille leikkaussaumaan.

Muuttumattomien parametrien lisäksi täytyi määritellä arvot solujen virtalähteille epätasaisen irradianssin mallintamiseksi. Virtalähteiden arvot sijoitettiin soluihin symmetrisesti keräysliuskojen tai kokoojakiskon suuntaisesti, kuten kuvassa 8. Virrat valittiin symmetrisiksi keräysliuskojen ja kokoojakiskon suuntaan, jotta virrankeräyskuvioinnin vaikutus eri suuntiin saatiin eristettyä. Keräysliuskojen suuntaan olevan irradianssin epätasaisuuden oletetaan vaikuttavan aurinkokennon toimintaan enemmän, koska tässä tapauksessa virta syntyy etäämmällä kokoojakiskosta ja kohtaa suuremman sarjaresistanssin.



Kuva 8. Valaistuskuviot epätasaisuuden ollessa keräysliuskojen suuntaista 1) ja kokoojakiskon suuntaista 2). Ristikko kuvaa simuloinneissa käytettyä matriisia, jonka jokaiseen soluun määritellään virtalähteen arvo valaistuskuvion mukaisesti. Valaistuskuvioissa värit vastaavat irradiansseja 20% epätasaisuuden tapauksessa seuraavasti: musta (virrankeräyskuviointi) 0 W/m², keltainen 800 W/m², vihreä 900 W/m², sininen 1000 W/m², oranssi 1100 W/m² ja punainen 1200 W/m².

Kummassakin tapauksessa virrat valittiin siten, että niiden summa on sama kuin tasaisesti valaistulla aurinkokennolla. Tämä tehtiin kennolle tulevan tehon vakioimiseksi, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. Taulukossa 2 on esitetty virrantiheyksien arvot 2 %, 10 %, 20 % ja 50 % irradianssin epätasaisuuksilla.

Taulukko 2. Simuloinneissa käytetyt irradianssin epätasaisuudet ja niihin liittyvät lukuarvot.

Irradianssin epätasaisuus	Irradianssi W/m ²	Virrantiheys mA/cm ²
2 %	980, 990, 1000, 1010, 1020	37,2 37,6 38 38,4 38,8
10 %	900, 950, 1000, 1050, 1100	34,2 36,1 38 39,9 41,8
20 %	800, 900, 1000, 1100, 1200	30,4 34,2 38 41,8 45,6
50 %	500, 750, 1000, 1250, 1500	19 28,5 38 47,5 57

3.3 SIMULAATIO

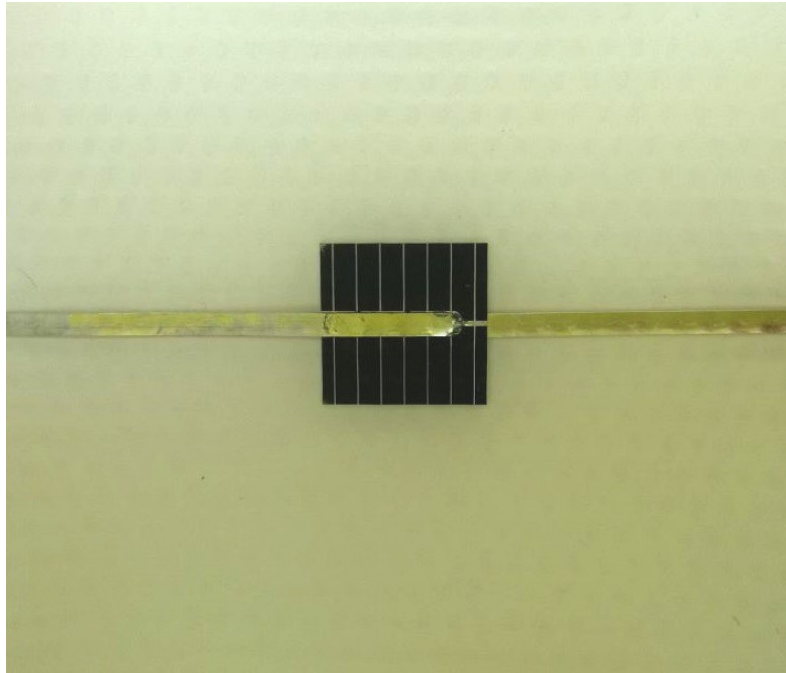
Simulaatiot tehtiin kannettavalla tietokoneella, jossa oli käyttöjärjestelmänä windows 10. Tietokoneen suorittimen kellotaajuus oli 2.4 GHZ ja se käytti 64-bittistä arkkitehtuuria. Muistia koneessa oli 6 GB. Käytännössä simuloinnille annettiin käyttöön 75 % suorittimen laskentatehosta. Yhteensä kahdeksan IV-käyrän simulointiin kului aikaa noin neljä tuntia. Simulointiajan pituuden takia näytteen koko rajoitettiin 100x100 soluun. Rajallinen resoluutio johtaa virran kerääntymiseen keräysliuskojen alle, joka nostaa tehohäviöitä näissä soluissa. Lähteen [15] mukaan rajallinen resoluutio vaikuttaa eniten täyttökertoimen arvoon, joka tässä työssä johtaa 1.5 % todellisuutta pienempään täyttökertoimeen. Näytettä simuloitiin kokoojakiskon sekä keräysliuskojen suuntaan kuvassa 8 olevilla valaisukuvioilla. Kumpaankin suuntaan tehtiin neljä eri simulaatioita kasvavin epätasaisuuksin, jotka olivat 2 %, 10 %, 20 % ja 50 %. Simulaatiotulokset on esitetty seuraavalla sivulla taulukossa 3.

Taulukko 3. Simulaatiotulokset.

Irradianssin epätasaisuus	I_{sc}	I_{mp}	V_{oc}	V_{mp}	FF	η
2 % kokoojakiskon suuntaan	33,00 mA/cm ²	31,32 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,21 %	15,81 %
2 % keräysliuskojen suuntaan	33,01 mA/cm ²	31,33 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,21 %	15,81 %
10 % kokoojakiskon suuntaan	32,95 mA/cm ²	31,28 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,21 %	15,78 %
10% keräysliuskojen suuntaan	33,01 mA/cm ²	31,32 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,18 %	15,80 %
20 % kokoojakiskon suuntaan	32,90 mA/cm ²	31,22 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,19 %	15,75 %
20 % keräysliuskojen suuntaan	33,01 mA/cm ²	31,31 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,11 %	15,79 %
50 % kokoojakiskon suuntaan	32,73 mA/cm ²	31,01 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	77,05 %	15,63 %
50 % keräysliuskojen suuntaan	33,01 mA/cm ²	31,17 mA/cm ²	0,62 V	0,5 V	76,70 %	15,69 %

4 MITTAUKSET

Mittauksissa käytettävä fyysinen näyte on $10 \times 10 \text{ mm}^2$ kokoinen aurinkokennon kappale, joka on laserleikattu standardikokoisesta $156 \times 156 \text{ mm}^2$ monikiteisestä piiaurinkokennosta. Kenno on leikattu kuvan 9 mukaisesti. Sen keskelle jää osa kokoojakiskosta ja keräysliuskoja kummallekin laidalle. Leikkauksen jälkeen kennoon on juotettu kuparinauhat, joihin kytkeydytään kennoa mitattaessa.



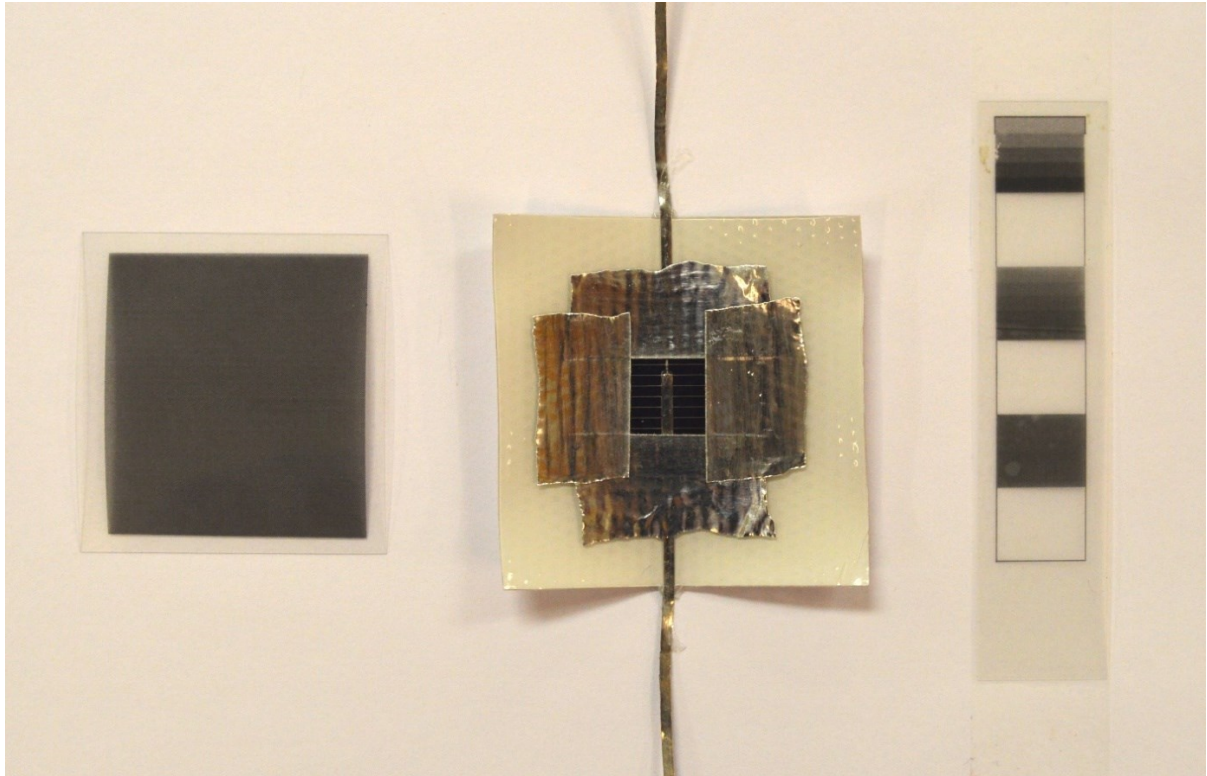
Kuva 9. Mittauksissa käytetty näyte, $10 \times 10 \text{ mm}^2$ laserleikattu osa standardikokoisesta $156 \times 156 \text{ mm}^2$ aurinkokennosta.

Näyte on leikattu korkean hyötysuhteen, $\eta = 19,3\%$, aurinkokennosta. Valmistajan antamien tietojen mukaan aurinkokennon $V_{oc} = 0,639 \text{ V}$, $I_{sc} = 37,9 \text{ mA/cm}^2$, $V_{mp} = 0,535 \text{ V}$ ja $I_{mp} = 35,6 \text{ mA/cm}^2$. Aurinkokenno mitattiin ennen kuin näyte leikattiin irti kennosta. Mittaustuloksia on verrattu annettuihin parametreihin taulukossa 4.

Taulukko 4. Aurinkokennon mittaustulokset verrattuna valmistajan antamiin tietoihin.

	V_{oc}	I_{sc}	V_{mp}	I_{mp}	η
Annetut parametrit	0,639 V	37,9 mA/cm ²	0,535 V	35,6 mA/cm ²	19,3 %
Mitatut parametrit	0,637 V	37,8 mA/cm ²	0,534 V	35,5 mA/cm ²	19,2 %
100 % - (Annetut parametrit/ Mitatut parametrit)*100 %	+ 0,3 %	+ 0,26 %	+ 0,19 %	+ 0,28 %	+ 0,52 %

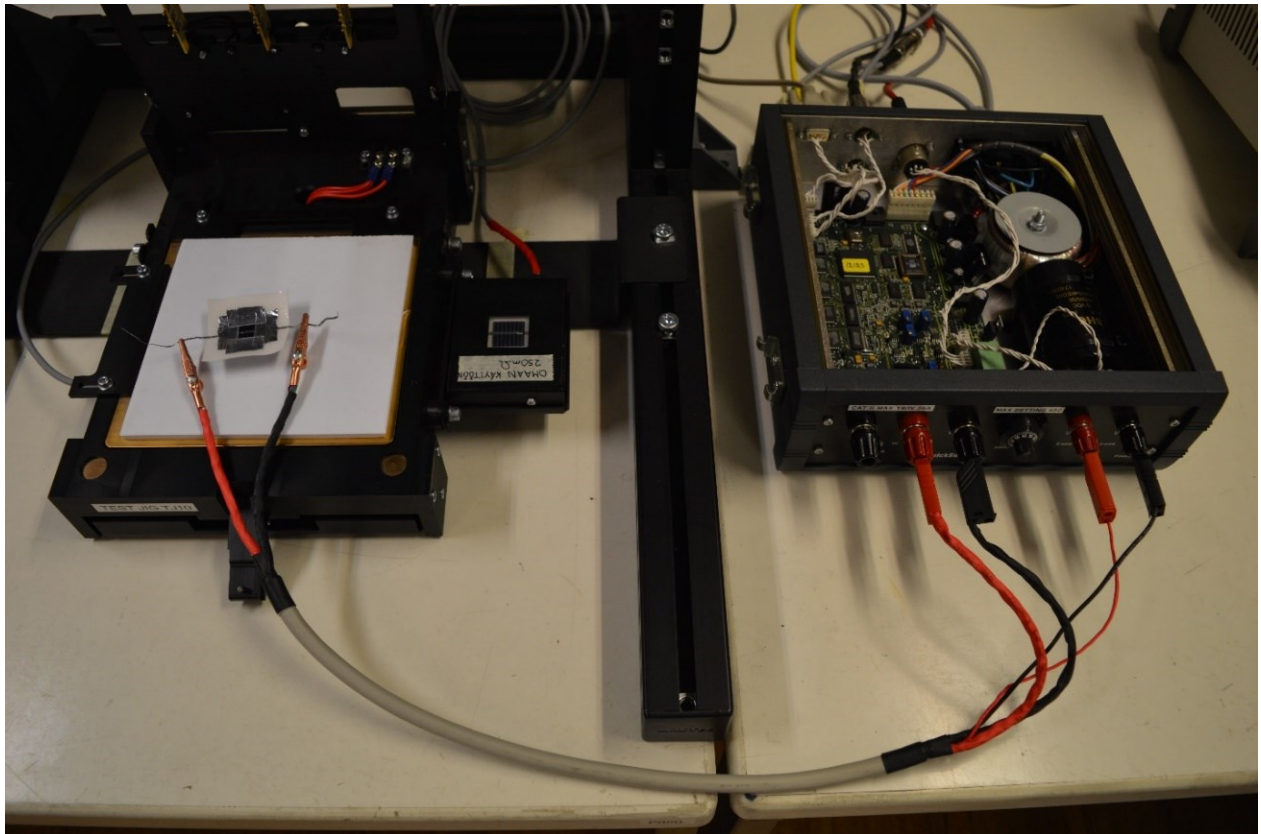
Näytteen pinnalle luotiin epätasainen irradianssi optisilla suodattimilla, jotka tehtiin tulostamalla harmaa-arvoja piirtoheitinkalvolle. Suodattimien kuviot muotoiltiin simuloinnissa käytettyjen muotojen muotoisiksi, kuten nähdään kuvasta 10. Suodattimet luovat kennon pinnalle 2 %, 20 % ja 50 % epätasaisuuksia. Suodatinta 10 % epätasaisuudelle ei saatu toteutettua työssä käytetyllä menetelmällä, joten mittaukset sisältävät yhden mittapisteen vähemmän kuin simulaatiot. Suodattimien läpäisy ja tasalaatuisuus varmistettiin spektrometrillä. Näytteen suojelemiseksi se on laminoitu läpinäkyvän kalvon sisälle. Mittauksissa kennoa ympäröivä laminaatti peitettiin, koska kennon ulkopuoliselle laminaatille tuleva valo taittuu kennolle. Tämä todettiin työn aikana käytännön mittauksin, kun näyte antoi odotettua suuremman oikosulkuvirran. Ilmiö on tunnettu yleisesti ja sitä käytetään parantamaan aurinkopaneelien hyötysuhdetta [21].



Kuva 10. Mittauksissa käytetyt aurinkokenno ja suodattimet. Laminoitu aurinkokenno on kehystetty metalliteipillä, jotta kennon pinta-alan ulkopuolelta laminaatista taittunut valo ei vääristä mittauksia. Vasemmalla olevaa suurempaa homogeenistä suodatinta käytettiin monitorikennolle tulevan valon vaimentamiseen. Oikealla olevia porrastettuja suodattimia käytettiin epätasaisen valaistuksen luomiseksi kennon pinnalle.

Porrastettujen filttien lisäksi tehtiin suurempi filtti, jonka transmissio on 50 %. Tätä filttiä käytettiin suodattamaan monitorikennolle tulevaa valoa. Monitorikennon on aurinkosimulaattorin osa jolla mitataan irradianssia. Irradianssi-signaalin avulla voidaan IV-mittaus liipaista halutulla irradianssitasolla. Tässä työssä mittaukset tehtiin 2000 W/m² irradianssitasolla, jotta näytteelle saatiin luotua filtereillä alueita joilla irradianssi saa arvoja välillä 500 - 1500 W/m².

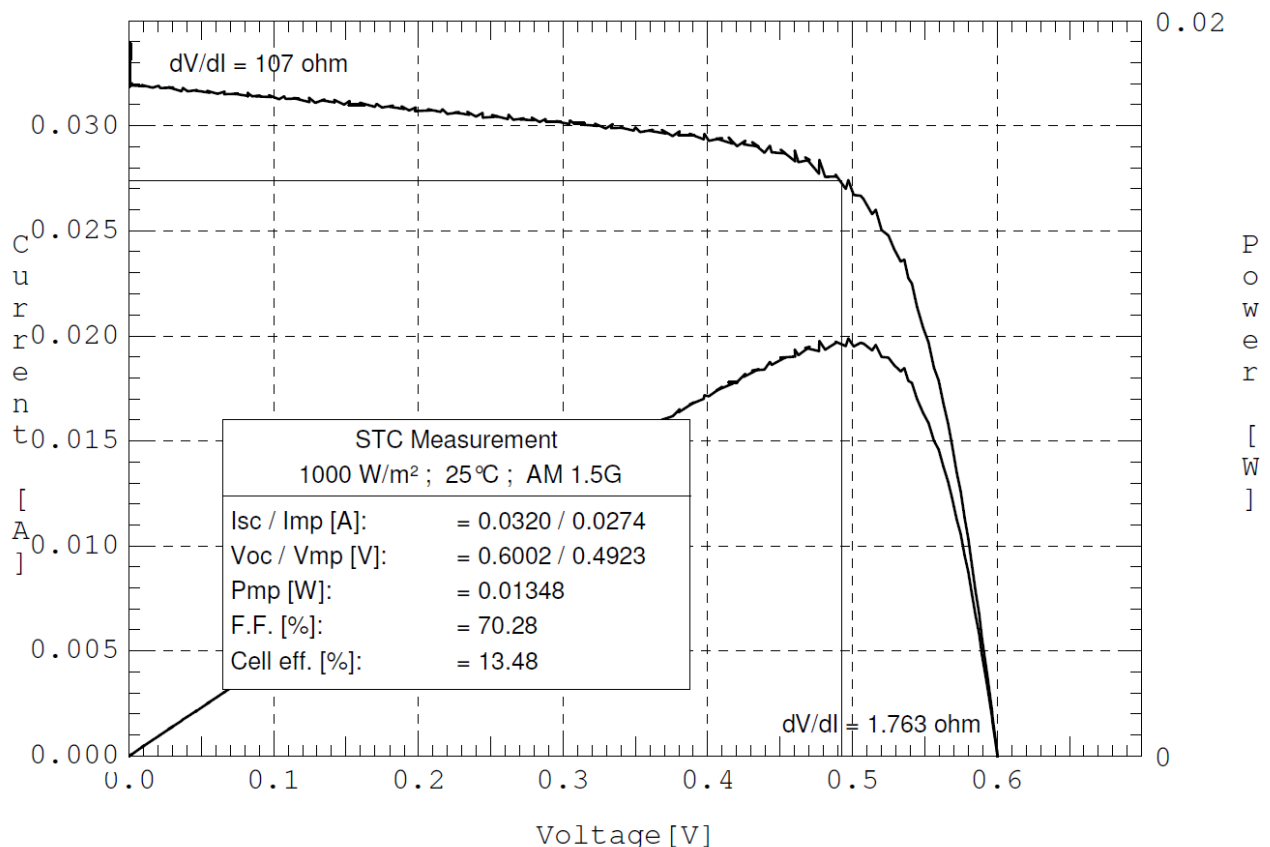
Näytteeseen kytkeydyttiin matalainduktanssisella nelipistemittauskaapelilla, joka nähdään kuvassa 11. Aurinkosimulaattorilla kompensoitiin mittakaapelissa syntyvät häviöt säätämällä tarvittava määrä etujännitettä. Näin varmistettiin, että kennon yli tapahtuva jännitepyyhkäisy alkaa avoimesta piiristä ja päättyy oikosulkuun. Mittauksiin käytetty aurinkosimulaattori tuottaa 30 ms mittaisen tasaisen valopulssin, jonka aikana IV-mittaus suoritetaan. IV-mittaus oli 7 ms mittainen kahdesta osasta koostuva jännitepyyhkäisy. Mittalaite säädettiin erikseen mittaamaan pieniä, alle 50 mA, virtoja.



Kuva 11. Mittausjärjestelmä. Vasemmalta lukien kuvassa on näyte, monitorikenno ja mittauselektronikka.

Ennen mittauksia aurinkosimulaattorin lamppu säädettiin tuottamaan normaalia voimakkaampi valopulssi, jotta mittaukset saadaan tehtyä suunnitellussa 2000 W/m^2 irradianssitasossa. Monitorikennolle tulevaa irradianssia suodattamaan asetettiin optinen suodatin, jonka transmissio on 50 %. Monitorikennolla mitattu signaali liipaisee mittauksen, kun suodatettu irradianssi on standardin määrittelemällä 1000 W/m^2 tasolla. Suodattimet teipattiin monitorikennon ja näytteen pintaan mahdollisimman tiiviisti heijastumisten ja valontaittumisten minimoimiseksi.

Kuvassa 12 on esitetty aurinkosimulaattorin antama IV-käyrä mittauksesta, jossa irradianssin epätasaisuus oli 20% kokoojakiskon suuntaan. IV-käyrässä ja tehokäyrässä näkyvä kohina johtuu mittalaitteen rajallisesta resoluutiosta ja epätarkkuudesta pienillä virroilla. Kohinan vaikutuksen minimoimiseksi jokaisessa mittapisteessä tehtiin viisi mittausta, joista laskettiin keskiarvo. IV-käyrän alussa oleva piikki virrassa johtuu mittalaitteen säädöistä. Mittalaite suodattaa piikin automaattisesti, eikä se vaikuta oikosulkuvirran arvoon.



Kuva 12. IV- ja tehokäyrät mittauksista 20 % irradianssin epätasaisuudella kokoojakiskon suuntaan.

Lopulliset keskiarvoistetut mittaustulokset variaatiokertoimineen ovat esillä seuraavalla sivulla taulukossa 5. Näyte mitattiin kolmella eri irradianssin epätasaisuudella, jotka olivat 2 %, 20 % ja 50 %. Mittaukset toistettiin kokoojakiskon ja keräysliuskojen suuntaan.

Taulukko 5. Keskiarvoistetut mittaustulokset ja niiden variaatiokertoimet.

Irradianssin epätasaisuus	I_{sc}	I_{mp}	V_{oc}	V_{mp}	FF	η
2 % kokoojakiskon suuntaan	32,3 mA/cm ² ± 0,07 %	27,5 mA/cm ² ± 0,12 %	0,6 V ± 0,02 %	0,49 V ± 0,14 %	70,4 % ± 0,08 %	13,59 % ± 0,03 %
2 % keräysliuskojen suuntaan	32,19 mA/cm ² ± 0,03 %	27,55 mA/cm ² ± 0,32 %	0,6 V ± 0,05 %	0,49 V ± 0,27 %	70,41 % ± 0,09 %	13,59 % ± 0,08 %
20 % kokoojakiskon suuntaan	31,99 mA/cm ² ± 0,15 %	27,38 mA/cm ² ± 0,07 %	0,6 V ± 0,07 %	0,49 V ± 0,10 %	70,26 % ± 0,08 %	13,5 % ± 0,07 %
20% keräysliuskojen suuntaan	31,79 mA/cm ² ± 0,04 %	27,35 mA/cm ² ± 0,17 %	0,6 V ± 0,12 %	0,49 V ± 0,14 %	69,87 % ± 0,20 %	13,43 % ± 0,12 %
50 % kokoojakiskon suuntaan	32,09 mA/cm ² ± 0,28 %	27,39 mA/cm ² ± 0,18 %	0,6 V ± 0,06 %	0,49 V ± 0,17 %	70,34 % ± 0,14 %	13,51 % ± 0,10 %
50 % keräysliuskojen suuntaan	31,64 mA/cm ² ± 0,32 %	27,11 mA/cm ² ± 0,35 %	0,6 V ± 0,36 %	0,49 V ± 0,30 %	69,78 % ± 0,05 %	13,3 % ± 0,07 %

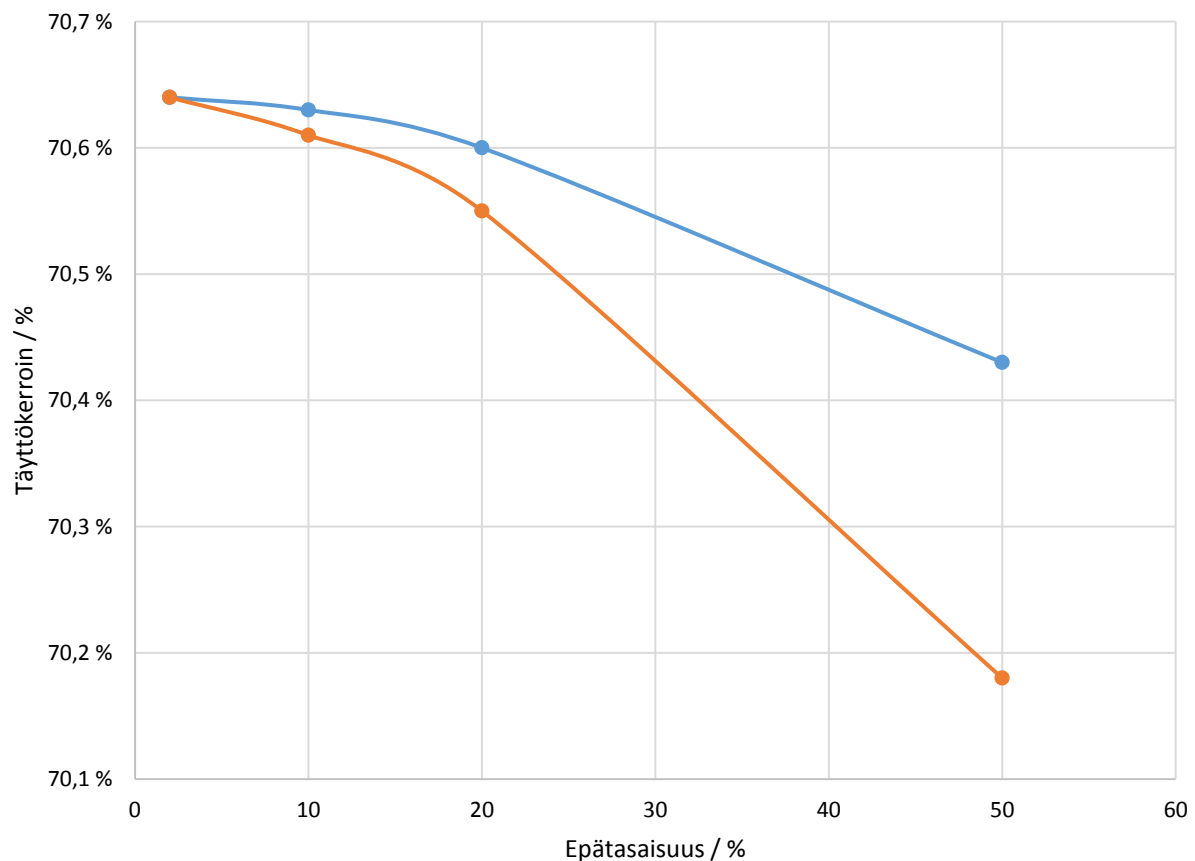
5 TULOSTEN VERTAILU

Simuloinneista saatiin tuloksina IV-käyrät 2 %, 10 %, 20 % ja 50 % epätasaisuuksilla keräysliuskojen ja kokoojakiskon suuntaan. Mittauksista tulokset saatiin 2%, 20% ja 50% epätasaisuuksilla. Simulointien ja mittausten tuloksia verrataan keskenään taulukossa 6, josta nähdään tarkemmin erot parametrien välillä. Mittaustulokset ovat systemaattisesti pienempiä kuin simulaatiotulokset. Tästä voidaan päätellä että simulaatioon käytetyn sijaiskytkennän komponenttiarvot eivät kuvaa mitattua näytettä tarkasti.

Taulukko 6. Mittaustulosten suhde simulaatiotuloksiin.

Irradianssin epätasaisuus	I_{sc}	I_{mp}	V_{oc}	V_{mp}	FF	η
2 % kokoojakiskon suuntaan	-1,99 %	-1,67 %	-3,17 %	-3,16 %	-0,33 %	-4,89 %
2 % keräysliuskojen suuntaan	-2,13 %	-1,77 %	-3,31 %	-3,43 %	-0,49 %	-5,23 %
20 % kokoojakiskon suuntaan	-1,29 %	-1,22 %	-3,39 %	-3,40 %	-0,12 %	-4,32 %
20% keräysliuskojen suuntaan	-1,82 %	-1,52 %	-3,19 %	-3,19 %	-0,22 %	-4,80 %
50 % kokoojakiskon suuntaan	-3,12 %	-2,27 %	-3,13 %	-3,83 %	-0,98 %	-6,08 %
50 % keräysliuskojen suuntaan	-3,60 %	-3,21 %	-3,10 %	-3,95 %	-0,57 %	-6,46 %

Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty simuloinneista saadut tulokset epätasaisen irradianssin vaikutuksesta täyttökertoimeen. Oletetusti keräysliuskojen suuntaan oleva epätasaisuus aiheuttaa suuremman muutoksen täyttökertoimessa.

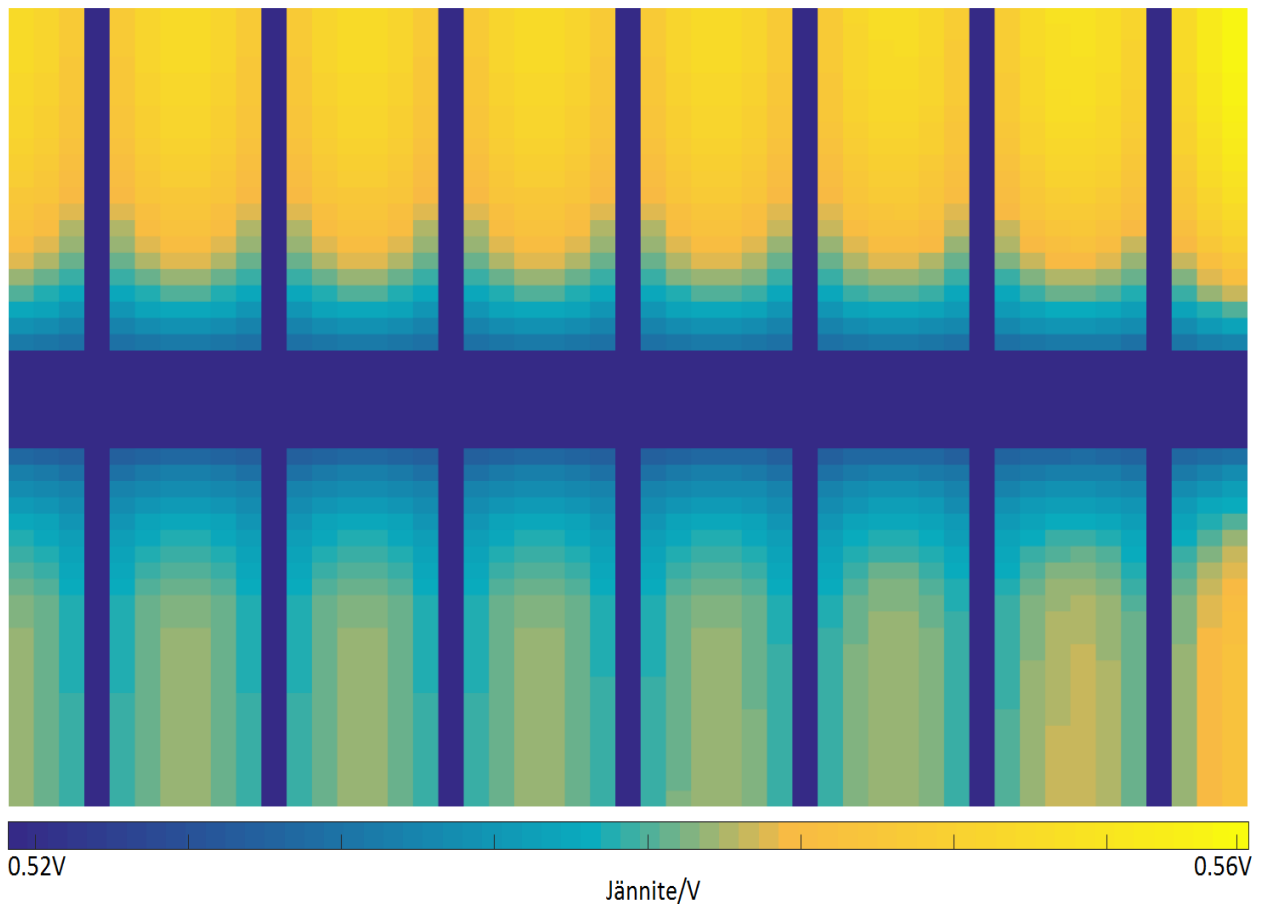


Kuva 13. Simulaatioista saadut täyttökertoimien kuvaajat irradianssin epätasaisuuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa täyttökertoimen muutosta kun irradianssin epätasaisuus muuttuu kokoojakiskon suuntaisesti, ja oranssi käyrä kun irradianssin epätasaisuus muuttuu keräysliuskojen suuntaisesti.

Hypoteesin mukaan ero johtuu virrankeräyskuvioinnin muodosta. Koontikiskon suuntaan muuttuva epätasaisuus tuottaa virtaa symmetrisesti keräysliuskojen suhteen. Tästä johtuen resistiivisten häviöiden pitäisi teoriassa pysyä vakiona epätasaisuuden kasvaessa. Keräysliuskojen suuntaan muuttuva epätasaisuus tuottaa virtaa epäsymmetrisesti koontikiskon ympärillä, jolloin keräysliuskoista etäällä oleva suuri virrantiheys johtaa suurempiin resistiivisiin häviöihin.

Kuvassa 14 on esitetty, SPICEGUI:lla simuloitu, potentiaali jakauma näytteen pinnalla, kun irradianssin epätasaisuus on keräysliuskojen suuntaainen. Kuvasta nähdään, että jännite korreloi

irradianssin aiheuttaman virran suuruuteen etäällä kokoojakiskosta. Kokoojakiskon lähellä jännite emitterillä laskee, koska virta alkaa keräytymään myös kokoojakiskolle.



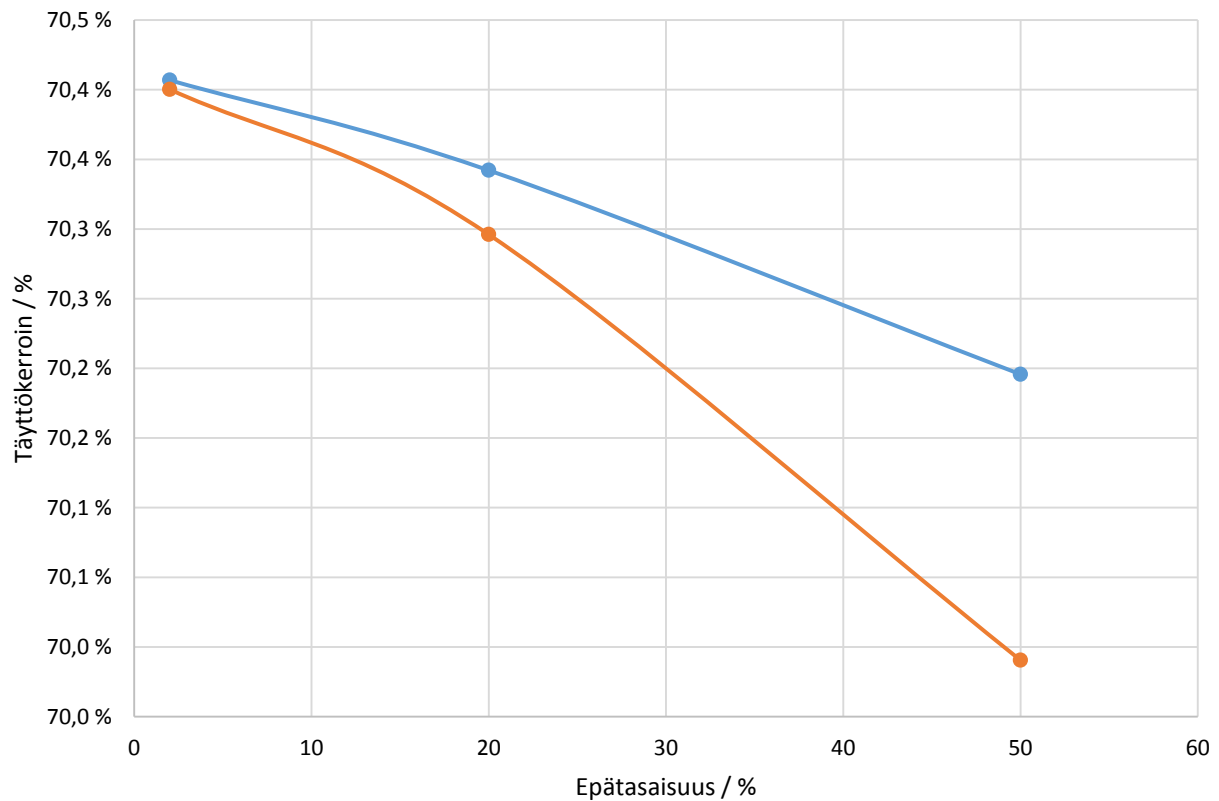
Kuva 14. Näytteen etupinnan simuloitu potentiaalijakauma, kun irradianssin epätasaisuus on 20 % keräysliuskojen suuntaan. Kuvan oikeassa reunassa oleva korkeampi potentiaali johtuu siitä että näytteen leikkaussauma ei ole tasan kahden keräysliuskan välistä.

Kennon pinnalle siis syntyy epätasaisen irradianssin vaikutuksesta myös epätasainen jännitejakauma. Sähkötehon määritelmän,

$$P = UI, \quad \{3\}$$

mukaisesti alueet, joilla on korkea virta ja jännite kuluttavat enemmän tehoa. Kuvan 14 perusteella keräysliuskojen välissä emitterillä esiintyy suurin osa häviöistä. Häviöt ovat voimakkaimpia emitterillä, koska emitterin resistanssi on suurin sarjaresistanssin komponenteista.

Kuvassa 15 on mittauksista saatujen täyttökertoimien riippuvuudet epätasaisesta irradianssista. Vertaamalla simulointien tuloksiin huomataan että mittauksissa esiintyy sama ilmiö, jossa irradianssin epätasaisuuden suunta vaikuttaa täyttökertoimeen.



Kuva 15. Mittauksista saadut täyttökertoimien kuvaajat irradianssin epätasaisuuden funktiona. Sininen käyrä kuvaa täyttökertoimen muutosta kun irradianssin epätasaisuus muuttuu kokoojakiskon suuntaisesti, ja oranssi käyrä kun irradianssin epätasaisuus muuttuu keräysliuskojen suuntaisesti.

Epätasaisen irradianssin vaikutus mittaus ja simulaatituloksiin on koottu taulukkoon 7. taulukossa on verrattu 20 % ja 50 % epätasaisuuksilla saatuja tuloksia 2% epätasaisuudella saatuihin tuloksiin, kun valaisukuvio muuttuu kokoojakiskon suuntaan. Taulukosta nähdään että irradianssin epätasaisuus vaikuttaa 20 % epätasaisuudella alle prosentin verran aurinkokennon parametreihin. Tuloksia tulkittaessa on huomioitava, että käytetty näyte ei ole täydellinen analogia aurinkokennolle.

Taulukko 7. Irradianssin epätasaisuuden vaikutus aurinkokennon parametreihin.

Irradianssin epätasaisuus	I_{sc}	I_{mp}	V_{oc}	V_{mp}	FF	η
20 % mittaus	- 0,44 %	- 0,42 %	- 0,14 %	- 0,25 %	- 0,21 %	- 0,68 %
20 % simulaatio	- 0,31 %	- 0,32 %	0 %	0 %	- 0,06 %	- 0,35 %
50 % mittaus	- 0,13 %	- 0,42 %	- 0,22 %	- 0,23 %	- 0,09 %	- 0,65 %
50 % simulaatio	- 0,83 %	- 0,87 %	0 %	0 %	- 0,3 %	- 1,21%

6 YHTEENVETO

Diplomityön tavoitteena oli selvittää spatiaalisesti epätasaisen irradianssin vaikutus aurinkokennon toimintaan. Tutkimuskysymyksen innoittajana toimivat aurinkosimulaattoristandardin IEC-60904-9 tarpeettoman tiukat kriteerit aurinkokennojen mittauksen suhteen. Standardi määrittelee vertailukelpoisen mittausasetelman ja olosuhteet aurinkomoduulien mittaamiseen. Yksi näistä olosuhteista on irradianssin spatiaalinen epätasaisuus mittaustasossa. Irradianssin epätasaisuus tuottaa erilaisen vasteen aurinkomoduuleissa ja aurinkokennoissa. Epätasaisen irradianssin vaikutusta aurinkokennon toimintaan tutkittiin simuloimalla aurinkokennoa ja varmistamalla simulointitulokset mittauksin.

Vasteen simulointiin käytettiin SpiceGui-simulointiohjelmaa, jolla voidaan rakentaa kaksiulotteisia malleja aurinkokennoista. Simulointimallia varten aurinkokenno esitettiin sijaiskytkentänä, johon kuuluu virtalähde, diodi ja häviöitä kuvaavia resistansseja. Simuloinneissa aurinkokennoa valaistiin askelittain vaihtuvalla irradianssilla, joko koontikiskojen tai keräysliuskojen suuntaan. Mittaukset jäljittelivät simulointeja, jotta niiden tulokset olisivat vertailukelpoiset. Simulointien ja mittausten tuloksia vertailtiin muun muassa täyttökertoimien osalta.

Täyttökertoimien vertailussa selvisi että keräysliuskojen suuntaan muuttuva irradianssi vaikuttaa aurinkokennon vasteeseen. 50 % irradianssin epätasaisuudella täyttökertoimissa on 0.28 % ero, kun valaisukuvio on keräysliuskojen tai kokoojakiskon suuntaan. Epätasaisuuden ollessa 2 % täyttökertoimien arvot ovat samat. Tämä tulos oli odotettavissa, koska mitä kauempana virta syntyy koontikiskoista sitä suuremmat ovat sarjaankytkettyjen resistanssien aiheuttamat häviöt kennon sisällä.

Näytteen hyötysuhdetta analysoitaessa eri epätasaisuuksilla huomattiin että 2 % epätasaisuudella näytteen hyötysuhteeseen tulee alle 1 % ero verrattuna 20 % epätasaisuuteen. Prosentin ero hyötysuhteessa on samaa suuruusluokkaa kuin aurinkosimulaattorin mittausepätaarkkuus. Tulosten perusteella voidaan todeta että aurinkokennosimulaattoreille sovellettavat irradianssin epätasaisuuden luokat A, B ja C ovat tarpeettoman tiukat. 10 % epätasaisuus tuottaa käytännössä saman tuloksen kuin 2 % epätasaisuus, muun mittalaitteiston pysyessä muuttumattomana.

LÄHTEET

1. **Hutchinson, Alex.** Solar Panel Drops to \$1 per Watt: Is this a Milestone or the Bottom for Silicon-Based Panels? [Online] Hearst Communications, 9. 2 2009. [Viitattu: 9. 12 2015.] <http://www.popularmechanics.com/science/energy/a4025/4306443/>.
2. **Wesoff, Eric.** First Solar CEO: 'By 2017, We'll Be Under \$1.00 per Watt Fully Installed' . [Online] 15. 6 2015. [Viitattu: 12. 9 2015.] <http://www.greentechmedia.com/articles/read/First-Solar-CEO-By-2017-Well-be-Under-1.00-Per-Watt-Fully-Installed>.
3. **International Electrotechnical Commission.** IEC 60904-9. *PHOTOVOLTAIC DEVICES – PART 9: SOLAR SIMULATOR PERFORMANCE REQUIREMENTS*. 10 01, 2007.
4. *The combined effect of non-uniform illumination and series resistance on the open-circuit voltage of solar cells.* **A. Cuevas, S. López-Romero.** Madrid : Elsevier Sequoia, 1983, Solar cells, Vol. 11, pp. 163-173.
5. *Effects of highly non-uniform illumination distribution on electrical performance of solar cells.* **E.T. Franklin, J.S Coventry.** Canberra : Australian national university, 2002.
6. **Yoshihiro Hishikawa, Haruya Shimura, Yuki Tsuno.** *Influence of non-uniformity of irradiance within a cell on the accurate I-V curve measurement under 1 sun illumination.* Ibaraki : National institute of advanced industrial science and technology, 2010.
7. **Christiana Honsberg, Stuart Bowden.** 4. Solar Cell Operation. [Online] 2008. [Viitattu: 20. 11 2015.] <http://pveducation.org/>.
8. *Analysis of the optical properties of screen-printed and aerosol-printed and plated fingers of silicon solar cells.* **R. Woehl, M. Hörteis, and S. W. Glunz,** 2008, Advanced Optoelectronics, Osa/vuosik. 2008, ss. 1-7.
9. **Schroder, Dieter K.** Resistivity. *Semiconductor material and device characterization.* New Jersey : A John Wiley & Sons, 2006, p. 9.
10. **Sunlab.** *ELG6373 Current directions for III-V multi-junction solar cell development.* Ottawa : Sunlab, 2014.
11. *Analysis of series and shunt resistance in silicon solar cells using single and double exponential models.* **Priyanka Sinkh, Nuggenhalli M. Ravindra.** EMR1, Newark : Institution of Civil Engineers, 2011, Vol. 1, pp. 33-38.
12. **Luis Castañer, Santiago Silvestre.** *Modelling Photovoltaic Systems using PSpice.* Barcelona : John Wiley & Sons, 2002.
13. *Simulation tool for Equivalent Circuit Modeling of Photovoltaic Devices.* **Stefan Eidelloth, Felix Haase, Rolf Brendel.** 4, 2012, IEEE Journal of Photovoltaics, Osa/vuosik. 4, ss. 572-579.

14. *Analyzing the effect of laterally varying emitter sheet resistance in combination with contact resistance.* **D.Grote, M. Hermle, E. A. Wotke, U. Belledin, M. Hörteis, M. Spitz, M. Kasemann, S. Rein D. Biro, W. Warta.** Valencia : s.n., 2008. 23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference.
15. *Analyzing lateral inhomogeneities of silicon solar cells using a quasi 3d circuit simulation tool based on spice.* **D. Grote, M. Kasemann, M. Hermle, W. Warta.** Milan : s.n., 2007. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference.
16. **Christiana Honsberg, Stuart Bowden.** 5.3. Top Contact Design. [Online] 2008. [Cited: 4 16, 2016.] <http://pveducation.org>.
17. **Ralf B. Wehrspohn, Uwe Rau, Andreas Gombert.** *Photon Management in Solar Cells.* Weinheim : Wiley-VCH, 2015. p. 343.
18. *Analysing Solar Cells by Circuit Modelling.* **Siyu Guo, Fa-Jun Ma, Bram Hoex, Armin G. Aberle, Marius Peters.** Singapore : s.n., 2011. PV Asia Pacific Conference.
19. **Maverick, Tim.** Oil Kingdom Becoming Solar Powerhouse. [Online] 13. 7 2015. [Viitattu: 9. 12 2015.] <http://www.wallstreetdaily.com/2015/07/13/saudi-arabia-solar-power/>.
20. **Neslen, Arthur.** India unveils global solar alliance of 120 countries at Paris climate summit . [Online] Guardian, 30. 11 2015. [Viitattu: 9. 12 2015.] <http://www.theguardian.com/environment/2015/nov/30/india-set-to-unveil-global-solar-alliance-of-120-countries-at-paris-climate-summit>.
21. **Upadhyay, Anand.** China 2020 Solar Energy Target = 200 Gigawatts. [Online] clean technica, 26. 7 2015. [Viitattu: 9. 12 2015.] <http://cleantechnica.com/2015/07/26/china-2020-solar-energy-target-200-gigawatts-rumor/>.
22. **International Energy Agency.** *2014 Snapshot of Global PV Markets.* s.l. : IEA, 2015.